BAKAR 51 (2026) 1 COPPER

UDK: 622:620.97(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2601031S
NAUČNI RAD
Oblast: Energetika

Primljen: 26.01.2026.
Prerađen: 24.04.2026.
Prihvaćen: 07.05.2026.

METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE ENERGETSKE TRANZICIJE RUDNIKA PRIMENOM INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA

METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE ENERGY TRANSITION OF MINES USING ENGINEERING EXPERIMENT

Željko Simić[1]

[1]Elektrane Stanari,Termoelektrana Stanari, Republika Srpska, BiH

[1]e-mail: zeljko.simic@gmail.com Orcid: https://www.orcid.org/0009-0000-3058-6813

Izvod

Ovaj rad predstavlja metodološki pristup optimizaciji energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama primenom teorije inženjerskog eksperimenta. Fokus istraživanja je na prenameni brownfield lokacija u fotonaponske sisteme uz primenu modifikovanog modela višestruke regresije za kvantifikaciju uticaja investicija i efikasnosti institucija na potrošnju obnovljive energije. Poseban akcenat stavljen je na meriteljsku preciznost prema standardu ISO/IEC 17025, analizu merne nesigurnosti u uslovima visoke zaprašenosti rudnika, te uvođenje tehnologija za skladištenje energije poput vanadijumskih redox-flow baterija (VRFB). Rezultati ukazuju na to da sinergija tehničke standardizacije, ekološke obnove kroz sekvestraciju ugljenika i regulatorne podrške direktno minimizuje ESG rizike, čineći brownfield lokacije ekonomski i tehnički opravdanijim rešenjem u odnosu na greenfield projekte.

Ključne reči: *inženjerski eksperiment, energetska tranzicija, degradirana rudarska zemljišta, fotonaponski sistemi, ISO/IEC 17025*

Abstract

This paper presents a methodological approach to optimizing the energy transition on degraded mining surfaces by applying the theory of engineering experiments. The research focuses on repurposing brownfield sites into photovoltaic systems, utilizing a modified multiple regression model to quantify the impact of investment types and institutional effectiveness on renewable energy consumption. Special emphasis is placed on metrological precision according to the ISO/IEC 17025 standard, measurement uncertainty analysis in high-dust mining environments, and the implementation of energy storage technologies such as Vanadium Redox Flow Batteries (VRFB). The results indicate that the synergy of technical standardization, ecological restoration through carbon sequestration, and regulatory support directly minimizes ESG risks, making brownfield locations a more economically and technically viable solution compared to greenfield projects.

Keywords: *engineering experiment, energy transition, degraded mining lands, photovoltaic systems, ISO/IEC 17025*

UVOD

Ovaj rad koristi metodologiju inženjerskog eksperimenta kako bi optimizovao proces tranzicije, tretirajući degradirane površine kao dinamičke sisteme sa kontrolisanim ulaznim parametrima. Globalni proces dekarbonizacije podrazumeva intenzivno smanjenje kapaciteta zasnovanih na uglju, što zahteva razvoj novih modela za prenamenu postojećih energetskih resursa. Gledano iz inženjerske perspektive, to podrazumeva gašenje praktično jedne proizvodne jedinice svakog dana u naredne dve decenije. Ovako intenzivan tempo tranzicije zahteva hitno pronalaženje novih modela za prenamenu resursa, što ovaj rad čini direktno primenjivim u rešavanju globalnog energetskog debalansa.

Ovaj metodološki okvir ne nudi samo teorijsku analizu, već služi kao inženjerska platforma za smanjenje merne nesigurnosti u ekstremnim rudarskim uslovima. Implementacijom standardizovanih protokola i naprednih sistema za skladištenje, rad postavlja temelje za transformaciju degradiranih lokacija u predvidljive i stabilne energetske čvorove moderne mreže. Ovo istraživanje ne posmatra energetsku tranziciju samo kao tehničko pitanje instalacije panela, već kao višekriterijumsku optimizaciju. U tom modelu, tehnički parametri definišu izlaznu funkciju proizvodnje energije (ES), dok socio-ekonomski (IHDI, GEF) i ekološki (ε) faktori predstavljaju granične uslove koji definišu održivost projekta na specifičnoj lokaciji rudnika.

U ovom radu optimizacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama definiše se kao inženjerski problem maksimizacije godišnje proizvodnje električne energije (*ES*) iz fotonaponskog sistema, uz istovremenu minimizaciju gubitaka usled zaprljanosti panela (λp) i merne nesigurnosti (u). Posmatrani sistem tretira se kao skup međusobno povezanih tehničkih i meriteljskih parametara, gde ulazne veličine (intenzitet sunčevog zračenja *Ht*, raspoloživa površina *S*, efikasnost sistema η, te gubici λ_p i λ_c) određuju izlaznu funkciju proizvodnje energije. U tom smislu, optimizacija se formalno može prikazati kao višekriterijumski problem:

$$\max \mathrm{ES} = \mathrm{f}(\mathrm{Ht}, \mathrm{S}, \eta, \lambda\mathrm{p}, \lambda\mathrm{c})$$

$$\min \varepsilon = \mathrm{f}(\mathrm{u}, \lambda\mathrm{p})$$

gde su:

- ES – ukupna godišnja proizvodnja električne energije,
- Ht – intenzitet sunčevog zračenja,
- S – raspoloživa površina za instalaciju,
- η – ukupna efikasnost sistema,
- λp – gubici usled zaprljanosti panela,
- λc – tehnički gubici sistema,
- u – standardna merna nesigurnost,
- ε – ukupna relativna greška sistema.

Svi navedeni parametri su merljivi ili procenjivi u realnim uslovima rudarskog okruženja, pri čemu su ograničenja definisana karakteristikama lokacije, tehničkim standardima i regulatornim okvirom.

TEORIJSKE OSNOVE INŽENJERSKOG EKSPERIMENTA U ENERGETICI

Analiza tehničke izvodljivosti na specifičnim podlogama

U okviru ovog istraživanja, inženjerski eksperiment podrazumeva kontrolisano variranje ključnih parametara sistema, pre svega stepena zaprljanosti fotonaponskih panela (λp) i nivoa merne nesigurnosti (u), uz praćenje njihove refleksije na ukupnu proizvodnju električne energije (ES). Eksperiment se zasniva na kombinaciji terenskih uslova karakterističnih za rudarsko okruženje i matematičkog modeliranja energetskog prinosa. Uvođenje fotonaponskih sistema u energetske sisteme koji su tradicionalno bili zasnovani na uglju zahteva strogo pridržavanje međunarodnih normi. Analiza pokazuje da je industrija solarnih panela danas jedna od najnaprednijih u pogledu standardizacije testiranja i validacije proizvodnje. Prilikom planiranja inženjerskog eksperimenta, ključni ulazni parametri za postavljanje fotonaponskih sistema na degradiranim zemljištima su nagib terena i izgradiva površina. Prema tehničkim preporukama organizacije ICMA [1], za optimalnu održivost lokacije neophodno je da nagib bude manji od 10%, kako bi projekat bio tehnički i ekonomski opravdan.

Matematički model

U cilju kvantifikacije uticaja različitih tipova investicija i kvaliteta institucionalnog okvira na proces energetske tranzicije, u radu se primenjuje modifikovani empirijski model višestruke regresije. Ovaj model omogućava analizu direktnih i interakcionih efekata ključnih ekonomskih i ekoloških parametara na potrošnju obnovljive energije. Matematička formulacija operativnog modela, prema metodologiji koju su postavili Yahya i Rafiq [2], definisana je sledećom jednačinom:

$$REC_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 BFI_{it} + \alpha_2 GFI_{it} + \alpha_3 GEF_{it} + \alpha_4 BFIGEF_{it} + \alpha_5 GFIGEF_{it} + \alpha_6 TROP_{it} + \alpha_7 CO_{2it} + \alpha_8 GDP_{it} + \varepsilon_{it}$$

gde su:

- α_0: Slobodan član (intersept) – predstavlja procenjenu potrošnju obnovljive energije u slučaju kada bi sve ostale varijable u modelu imale vrednost nula;
- $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_8$: Koeficijenti parcijalne regresije – oni kvantifikuju jačinu i smer uticaja svake pojedinačne varijable na REC;

- REC (Renewable Energy Consumption) – predstavlja potrošnju obnovljive energije, a u inženjerskom smislu, ovaj parametar direktno korelira sa energetskom raznolikošću sistema.
- Za kvantifikaciju udela različitih resursa u ukupnoj proizvodnji uvodi se inovativna mera, Faktor energetske raznolikosti (EDF – Energy Diversity Factor), definisan izrazom:

$$EDF = \left(\sum_{i=0}^{n} E_i^{\frac{1}{2}} \right)^2$$

Gde su:

- *EDF*: Faktor energetske raznolikosti koji meri stepen diverzifikacije energetskog miksa,
- E_i - frakcija (udeo) pojedinačnog energetskog izvora i u ukupnoj potrošnji energije, pri čemu važi da je: $\sum Ei=1$,
- n - Ukupan broj različitih energetskih izvora koji se analiziraju u sistemu.

- BFI (Brownfield Investment) – predstavlja investicije u brownfield lokacije (prenamena postojećih industrijskih/rudarskih površina);
- GFI (Greenfield Investment) – predstavlja investicije u greenfield lokacije (izgradnja na novim, neiskorišćenim površinama);
- GEF (Government Effectiveness) – predstavlja indeks efikasnosti vlade (regulatorni kvalitet). U predloženom modelu, GEF se posmatra kao institucionalni okvir koji omogućava realizaciju investicija. Ovaj parametar je usko korelisan sa Indeksom ljudskog razvoja prilagođenim nejednakosti (IHDI), jer efikasna administracija direktno smanjuje gubitke u ljudskom razvoju usled nejednakosti. IHDI služi kao kontrolni mehanizam za validaciju varijable GEF i izračunava se kao:

$$IHDI = \sqrt[3]{(1 - A_{health})(1 - A_{education})(1 - A_{income})} \cdot \sqrt[3]{LEI \cdot EI \cdot GNI}$$

Gde su:

- A_{health}, $A_{education}$, A_{income} - Koeficijenti nejednakosti (procentualni gubitak indeksa) u oblastima zdravstva, obrazovanja i dohotka,
- *LEI* (Life Expectancy Index) - Indeks očekivanog životnog veka,
- *EI* - Indeks obrazovanja (kombinacija prosečnih i očekivanih godina školovanja),
- *GNI* (Gross National Income index) - Indeks bruto nacionalnog dohotka.

- BFIGEF – predstavlja interakciju brownfield investicija sa efikasnošću vlade;

- GFIGEF – predstavlja interakciju greenfield investicija sa efikasnošću vlade;
- TROP (Trade Openness) – predstavlja trgovinsku otvorenost tržišta;
- CO_2 – predstavlja emisiju ugljen-dioksida (indikator zagađenja);
- GDP – predstavlja bruto domaći proizvod po glavi stanovnika. U modelu se ovaj parametar normalizuje kroz Globalni nacionalni dohodak (GNI) primenom logaritamske skale:

$$GNI = \frac{\ln\left(GNI_{pc}\right) - \ln\left(100\right)}{\ln\left(75000\right) - \ln\left(100\right)}$$

Gde je:

- GNI_{pc} - Bruto nacionalni dohodak po glavi stanovnika u dolarima (PPP),
- 100 i 75.000 - Minimalne i maksimalne referentne vrednosti koje propisuje UNDP za potrebe standardizacije indeksa.

Integracija IHDI parametara u analizu varijable GEF omogućava modelu da prepozna kako institucionalna efikasnost (GEF) transformiše ekonomske ulaze (GDP, BFI) u održivu energetsku tranziciju, minimizujući pritom ESG rizike. Cilj inženjerskog eksperimenta je da kroz optimizaciju procesa na rudniku utičemo na rast koeficijenata α_1 i α_4 čime dokazujemo da su brownfield lokacije efikasniji put ka tranziciji nego neiskorišćena zelena polja (greenfield). Iz aspekta teorije eksperimenta, ova jednačina predstavlja funkciju cilja. Cilj inženjera je da kroz optimizaciju faktora BFI (investicije) i saradnju sa regulatorom (GEF), maksimizuje izlaz REC, uz minimizaciju slučajne greške ε. Poseban značaj u ovom modelu imaju interakcioni članovi BFIGEF i GFIGEF, koji matematički dešifruju sinergiju između tehno-ekonomskih ulaganja i institucionalne podrške. Sa stanovišta inženjerskog eksperimenta, ovi parametri ukazuju na to da energetska tranzicija degradiranih zemljišta nije samo tehničko pitanje instalacije kapaciteta, već proces čija efikasnost direktno zavisi od regulatornog okruženja.

Statističke osnove inženjerskog eksperimenta i obrada mernih podataka

Za statističku obradu eksperimentalnih podataka korišćene su osnovne mere deskriptivne statistike, u skladu sa klasičnom metodologijom eksperimentalnog naučnog rada [3]. U skladu sa teorijom dizajna i analize eksperimenata, analiza složenih tehničkih sistema zasniva se na identifikaciji ključnih izlaznih karakteristika i faktora koji na njih utiču, pri čemu se statističkim metodama kvantifikuju jačina pojedinačnih uticaja i njihove međusobne interakcije, čime se omogućava efikasna optimizacija sistema uz minimalan broj eksperimental-

nih ispitivanja [4]. Ove metode predstavljaju temelj teorije inženjerskog eksperimenta i posebno su značajne u analizi tehničkih i eksploatacionih parametara prilikom planiranja energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama. Aritmetička sredina primenjena je kao reprezentativna vrijednost rezultata merenja relevantnih parametara, kao što su nagib terena, raspoloživa izgradiva površina, prostorna homogenost lokacije i tehničke karakteristike fotonaponskih modula, a izračunata je prema izrazu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

gde je:

- $\bar{x}$ - Aritmetička sredina uzorka, koja predstavlja najverovatniju vrednost merene veličine,
- x_i - Pojedinačna izmerena vrednost u *i*-tom merenju,
- n - Ukupan broj izvršenih merenja.

Radi ocene rasipanja rezultata i pouzdanosti dobijenih podataka izračunate su varijansa i standardna devijacija uzorka, pri čemu je standardna devijacija određena izrazom:

$$s = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}}$$

Varijansa je korišćena kao mera disperzije rezultata i kao osnova za procenu homogenosti mernih podataka, što je od posebnog značaja prilikom evaluacije pogodnosti degradiranih rudarskih površina za ugradnju fotonaponskih elektrana, gde izražena heterogenost terena može imati direktan uticaj na tehničku i ekonomsku izvodljivost projekta. Standardna greška aritmetičke sredine, koja služi za procenu pouzdanosti srednje vrednosti i smanjenje uticaja slučajnih grešaka, izračunata je prema izrazu:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Gdje su:

- $s_{\bar{x}}$ - Standardna greška aritmetičke sredine (merna nesigurnost tipa A),
- s - Standardna devijacija uzorka,
- n - Broj ponovljenih merenja u eksperimentu.

Ovim je omogućena procena pouzdanosti srednje vrednosti i smanjenje uticaja slučajnih grešaka merenja. Radi preciznije komparacije rezultata dobijenih u različitim uslovima eksploatacije (npr. uticaj različitih stepena zaprašenos-

ti senzora), primenjuje se Welch-ov t-test, koji je robustan na nejednakost varijansi unutar uzoraka:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Gde su:

- $\bar{x}_1 \; i \; \bar{x}_2$ - Aritmetičke sredine prvog i drugog uzorka,
- $s_1^2 \; i \; s_2^2$ - Varijanse prvog i drugog uzorka,
- $n_1 \; i \; n_2$ - Broj merenja (veličine) prvog i drugog uzorka.

Ova statistička procedura omogućava inženjeru da sa visokim stepenom pouzdanosti potvrdi efikasnost predloženih mera optimizacije. Na osnovu statistički obrađenih srednjih vrednosti ulaznih parametara, u inženjerskom eksperimentu vrši se kvantifikacija energetskog potencijala degradiranih rudarskih površina za potrebe izgradnje fotonaponskih elektrana. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskog sistema izražena je relacijom [5]:

$$E_A = H_t \cdot S \cdot \eta_r \cdot \eta_{inv} \cdot [1 - \beta p \; (Tc - 25)] \cdot (1 - \; \lambda p) \cdot (1 - \; \lambda c)$$

Gde su:

- E_A - Ukupna generisana električna energija (kWh/h)
- H_t - Intenzitet ukupnog sunčevog zračenja na nagnutu površinu panela (kW/m^2),
- S - Ukupna izgradiva površina fotonaponskih modula (m^2),
- η_r - Nominalna efikasnost fotonaponskog panela pri standardnim testnim uslovima (STC),
- η_{inv} - Efikasnost invertora (stepen korisnosti pretvaranja jednosmerne u naizmeničnu struju),
- β_p - Temperaturni koeficijent snage panela (%/°C ili 1/°C),
- T_c - Radna temperatura fotonaponske ćelije (°C),
- 25 - Referentna temperatura ćelije prema STC (°C),
- λ_p - Gubici usled zaprljanosti panela (eng. *soiling losses*), što je ključni faktor u rudarskom okruženju,
- λ_c - Gubici u kablovima i ostalim komponentama sistema (eng. *cabling/mismatch losses*).

Na osnovu izračunate satne energije, ukupna godišnja proizvodnja električne energije (E_S) određuje se izrazom:

$$E_S = \sum_{t=1}^{8760} E_{A(t)}$$

Gde su:

- E_S - Ukupna godišnja proizvodnja električne energije (kWh ili MWh),
- $E_A(t)$ - Proizvodnja električne energije u konkretnom satu t (kWh), proračunata prema prethodno navedenoj jednačini za E_A,
- t - Vremenski interval (sat) u godini,
- 8760 - Ukupan broj sati u neprestupnoj godini.

Primena ovog modela omogućava da se rezultati statističke obrade mernih podataka direktno integrišu u proces optimizacije tehničke izvodljivosti fotonaponskih sistema na degradiranim rudarskim površinama, čime teorija inženjerskog eksperimenta dobija svoju praktičnu ulogu u procesu energetske tranzicije. Posmatrano iz tog ugla, primena navedenih statističkih metoda obezbeđuje da rezultati inženjerskog eksperimenta ne predstavljaju samo deskriptivnu tehničku procenu, već kvantitativno utemeljenu osnovu za donošenje odluka o prenameni degradiranih rudarskih površina u funkcionalne energetske objekte zasnovane na obnovljivim izvorima energije.

MATEMATIČKO MODELIRANJE ENERGETSKE TRANZICIJE

Specifičnost merenja i energetska metrologija u rudarskom okruženju

U inženjerskom eksperimentu, kvalitet dobijenih rezultata direktno zavisi od preciznosti ulaznih podataka. Prilikom postavljanja fotonaponskih (PV) sistema na degradiranim rudarskim površinama, meriteljski sistem se suočava sa specifičnim izazovima koji nisu prisutni kod standardnih solarnih elektrana:

- Uticaj ambijentalnih faktora na merne senzore - na lokacijama poput rudnika, visoka koncentracija suspendovanih čestica (prašine) i vibracije od teške mehanizacije direktno utiču na rad piranometara (senzora sunčevog zračenja),
- Sistemske greške - zaprašenost senzora može dovesti do sistematske greške merenja od 5% do 10%, što u matematičkom modelu, koje je naveden u poglavlju 2 značajno povećava član slučajne greške (ε),
- Održavanje sledivosti - sa aspekta metrologije, neophodno je uspostaviti stroge procedure redovnog održavanja i čišćenja senzora kako bi se očuvala sledivost merenja prema nacionalnim etalonima.

Statistička organizacija rezultata i analiza merne nesigurnosti

Svaki rezultat merenja u inženjerstvu je nepotpun bez iskaza o njegovoj mernoj nesigurnosti. U teškim uslovima rada, gde su faktori okruženja promenljivi, puko očitavanje trenutnih vrednosti nije dovoljno, već se primenjuje statistička obrada ponovljenih merenja. Prema stručnoj literaturi koja tretira statističku organizaciju merenja [6], ako su svi elementi uzorka ravnopravni, rezultat merenja se dobija kao aritmetička sredina uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

gde x_s predstavlja najverovatniju vrednost merene veličine, kao što je intenzitet solarnog zračenja na degradiranoj površini. Međutim, za procenu kvaliteta samog eksperimenta i stabilnosti mernog mesta u rudniku, ključno je odrediti mernu nesigurnost (MN) tipa A. Ona se određuje isključivo metodom statističke obrade rezultata ponovljenih merenja i numerički je jednaka standardnom odstupanju srednje vrednosti:

$$u_A = S_x A = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}}$$

Gde je:

- $u_A(S_{x_s}A)$: Standardna merna nesigurnost tipa A - predstavlja procenu rasipanja rezultata oko srednje vrednosti usled slučajnih uticaja,
- n: broj ponovljenih merenja - ukupna količina nezavisnih očitavanja piranometra u posmatranom intervalu,
- x_i: pojedinačni rezultat merenja - konkretna vrednost zračenja (npr. u W/m^2) očitana u i-tom merenju,
- x_s: aritmetička sredina uzorka – prosečna vrednost svih n merenja koja služi kao referentna tačka za proračun odstupanja,
- $(x_i\text{-}x_s)$: kvadrat odstupanja – matematički način da se osigura da i pozitivna i negativna odstupanja od proseka podjednako doprinose ukupnoj nesigurnosti.

Ovaj matematički iskaz direktno utiče na ekonomsku isplativost projekta. Ako posmatramo sistem snage 20 MW (Utility Scale), čak i mala merna nesigurnost od u = 2% u proceni solarnog resursa može rezultirati odstupanjem od nekoliko stotina MWh na godišnjem nivou. Upravo zbog toga, za inženjera energetike ova statistika predstavlja direktan faktor rizika koji utiče na:

1. Validaciju modela**:** određuje da li naša regresiona jednačina (REC) precizno odgovara stvarnom energetskom potencijalu,

2. Povrat investicije**:** merna nesigurnost se direktno prevodi u finansijsku nesigurnost, što je posebno kritično kod brownfield investicija gde su marže optimizacije uže.

Stoga, primena standarda ISO/IEC 17025 i metodologije izražavanja merne nesigurnosti prema Đekiću i saradnicima [6] u terenskim uslovima rudnika nije samo administrativno pitanje, već tehnička neophodnost. Kalibracija opreme osigurava da podaci prikupljeni tokom eksperimenta ispunjavaju uslove Centralne granične teoreme i Gausove raspodele, čime postaju pouzdana osnova za donošenje strateških odluka o energetskoj tranziciji.

INŽENJERSKI IZAZOVI I MERENJA

Kao što ističe izveštaj agencije IRENA [7], uspostavljanje najsavremenijih objekata za postavljanje i evaluaciju kompetencija, veština i znanja za obnovljivu energiju treba smatrati suštinskim za uspešno uvođenje ovih tehnologija, čime se direktno povezuje stručnost kadra sa pouzdanošću sistema [7]. Prema izveštaju Mirova [8], proces evaluacije investicija u energetsku tranziciju mora uključiti sistematsku analizu doprinosa Ciljevima održivog razvoja UN-a, pri čemu se insistira na tome da identifikovanje i minimiziranje ESG rizika povezanih sa investicijama predstavlja podjednako važan deo procena [8]. Standardizacija procesa na tzv. oštećenim lokacijama (eng. distressed sites) podrazumeva preuzimanje dugoročnih obaveza održavanja.

Princic [9] ističe da integracija solarnih sistema na zatvorenim odlagalištima efektivno produžava fazu post-operativne brige o zemljištu kroz redovno održavanje zaštitnog sloja (eng. cap maintenance) i sigurnosne infrastrukture. Pored operativnih izazova, tranzicija ka održivim izvorima energije zahteva i strateški pristup upravljanju resursima. Saleh i Hassan [10], ističu da su tehnološke inovacije revolucionisale obnovljive izvore energije čineći ih efikasnijim i skalabilnijim, ali su istovremeno nametnule potrebu za intenzivnijom upotrebom specifičnih mineralnih sirovina u poređenju sa konvencionalnim postrojenjima. Još se mora dodati da tehnička kompleksnost izazova u oblasti obnovljivih izvora energije zahteva multidisciplinarni pristup koji prevazilazi isključivo tehničke okvire i uključuje društvene i ekološke dimenzije novih tehnologija [11].

Ovakav pristup sugeriše da inženjer u eksperimentu ne sme posmatrati mernu opremu izolovano, već kao deo šireg socio-tehničkog sistema u kojem lokalni uslovi direktno diktiraju preciznost rezultata. Sakellariou i Mulvaney [11] još navode da više od polovine firmi u solarnom sektoru prijavljuje ozbiljne poteškoće pri zapošljavanju kvalifikovanih inženjera, što ukazuje na značajan jaz između potreba industrije i trenutne ponude specijalizovanog kadra. Ovaj globalni podatak potvrđuje da je edukacija i verifikacija kompetencija osoblja kritična tačka za stabilnost svakog istraživačkog procesa, što je osnova za identifikaciju nekonformnosti u ovom radu.

Ubrzana tranzicija ka obnovljivim izvorima energije u Evropi, iako vođena ambicioznim klimatskim ciljevima, suočava se sa ozbiljnim izazovima u pogledu stabilnosti elektroenergetskog sistema usled nedovoljnih investicija u tehnologije skladištenja energije. Visoka penetracija neupravljivih izvora dovodi do paradoksa u kojem se zelena energija često odbacuje (eng. curtailment) zbog niske potražnje, nedostatka interkonekcija ili neadekvatnih kapaciteta za balansiranje mreže [12]. Ovi rizici naglašavaju da inženjerski eksperiment ne sme biti fokusiran samo na nominalnu snagu panela, već na meriteljsku preciznost sistema koji omogućava predvidljivost proizvodnje, čime se direktno smanjuje rizik od nestabilnosti mreže i potencijalnih energetskih ispada (eng. blackouts). U tom smislu, matematički opis scenarija energetske tranzicije pruža okvir za razumevanje dinamike rasta kapaciteta obnovljivih izvora. Prema metodologiji koju predlažu Akaev i Davydova [13,14], nominalna globalna potražnja za energijom (E_w) direktno je uslovljena populacionim trendovima i stabilizacijom potrošnje, što se definiše relacijom:

$$E_w(t)=e_w \cdot N_w(t)$$

Gde su:

- $E_{w(t)}$ - Globalna potražnja za primarnom energijom u vremenu *t*,
- e_w - Specifična potrošnja energije po glavi stanovnika (konstanta preuzeta iz literature),
- $N_{w(t)}$ - Prognoziran broj svetske populacije u godini *t*.

Za modeliranje prodora solarne energije kao specifičnog resursa, primenjuje se modifikovana logistička funkcija oblika:

$$E_r(t) = E_{r1} \cdot \left[1 + \frac{E_{r2}}{1 + r_{ES} \cdot exp[-\sigma_{ES}(t - T_0)]}\right]$$

Definicija parametara i metodološki okvir:

- $E_r(t)$ - Predviđeni ukupni kapacitet resursa u posmatranoj godini *t*,
- E_{r1} - Bazni (početni) kapacitet resursa u referentnoj godini,
- E_{r2} - Relativni potencijal rasta (faktor zasićenja) u odnosu na baznu vrednost,
- r_{ES} - Parametar koji definiše početne uslove difuzije tehnologije,
- σ_{ES} - Stopa tehnološkog prodora koja određuje nagib S-krive,
- T_o - Vreme maksimalnog rasta (tačka infleksije).

Parametri r_{ES} i σ_{ES} identifikovani su metodom najmanjih kvadrata (LSM) na osnovu empirijskih podataka o instaliranim kapacitetima u periodu 2010–2025. godine. Dok je struktura modela preuzeta iz literature [13,14], konkretne

vrednosti koeficijenata su rezultat originalne obrade podataka prilagođene specifičnostima tržišta obnovljivih izvora energije, čime je omogućena integracija lokalnih faktora u globalni trend.

U okviru inženjerskog eksperimenta, ključni korak ka validnosti rezultata je identifikacija kritičnih tačaka u kojima laboratorijska praksa odstupa od strogih zahteva standarda ISO/IEC 17025. Primenom metodologije analize jaza (Gap Analysis), prepoznate su ključne nekonformnosti koje mogu ugroziti preciznost merenja u rudniku. Tabela 1 sistematizuje ove nedostatke, oslanjajući se na iskustva iz akademskog sektora [15], te nudi konkretne inženjerske preporuke za standardizaciju procesa.

Matematički modeli prodora tehnologija i energetske efikasnosti

Za razumevanje dinamike tranzicije neophodno je primeniti modele koji kvantifikuju brzinu prodora izvora i nivo efikasnosti. Nova paradigma energetike u 21. veku nalaže stabilizaciju potrošnje prema relaciji: $E_w=1{,}8\cdot N_w$ pri čemu se predviđa da će se globalna potražnja kretati u direktnoj proporciji sa populacijom, uz pretpostavku postizanja 1.8 tone po glavi stanovnika godišnje [13,14]. Ključna varijabla u ovom procesu je stopa energetske efikasnosti (k_{ee}), koja prati logistički zakon rasta:

$$k_{ee} = \frac{k_{ee0}(1 + C)}{1 + C \cdot \exp[-d(t - T_{ee0})]}$$

Definicija parametara:

- k_{ee} - Projektovana stopa energetske efikasnosti u godini t,
- k_{ee0} - Početna vrednost stope energetske efikasnosti u referentnoj godini,
- C - Koeficijent zasićenja koji određuje maksimalni potencijal unapređenja energetske efikasnosti,
- d - Stopa intenziteta rasta-brzina kojom se usvajaju tehnologije energetske efikasnosti,
- t - Posmatrana godina u simulacionom periodu,
- T_{ee0} - Referentna (bazna) godina od koje se prati rast efikasnosti.

Ova funkcija modelira prelazak sa ekstenzivnog na intenzivni razvoj, dok se rast kapaciteta specifičnog resursa (E_r) opisuje funkcijom:

$$E_r(t) = E_{r1} + \frac{E_{r2}}{1 + r_{ES} \cdot exp - \sigma_{ES}(t - T_o)}$$

gde su parametri identifikovani metodom najmanjih kvadrata na osnovu retrospektivnih podataka i ambicioznih scenarija razvoja. Preciznost identifikacije ovih parametara direktno zavisi od kvaliteta podataka. Pored praćenja rasta pojedinačnih kapaciteta, nivo uspešnosti energetske tranzicije

kvantifikuje se putem Faktora energetske raznolikosti (EDF), koji prema već navedenoj jednačini: $EDF = \left(\sum_{i=0}^{n} E_i^{\frac{1}{2}}\right)^2$ precizno meri prelazak sa monolitnog sistema na bazi uglja ka hibridnom modelu sa više izvora. Ako su merenja opterećena nekonformnostima, poput onih sistematizovanih u Tabeli 1, matematički model gubi prediktivnu moć, što na kraju ugrožava dostizanje ciljeva dekarbonizacije definisanih Pariškim sporazumom.

Tabela 1. *Analiza jaza - trenutna laboratorijska praksa i zahtevi standarda ISO/IEC 17025 [15]*

ISO 17025 Zahtev	Detektovana nekonformnost (Jaz)	Inženjerska preporuka za otklanjanje
5.2.1 Osoblje (Osposobljenost)	Upotreba tehničkog osoblja i studenata bez specifične obuke za solarne merne sisteme.	Uspostavljanje programa kontinuirane obuke i verifikacija kompetencija za rad sa specifičnom PV opremom.
5.4.5 Validacija metoda	Korišćenje nestandardnih metoda merenja na rudarskom terenu bez SOP-ova (Standar-dnih operativnih procedura).	Validacija internih metoda za merenje degradacije panela u uslovima prašine; izrada pisanih SOP-ova za svaki test.
5.5.3 Oprema (Upravljanje)	Nedostatak zapisa o servisiranju i kalibraciji; rizik od ne-ovlašćenog rukovanja opremom.	Uvođenje digitalnih kontrolnih kartona; definisanje hijerarhije pristupa i obavezna eksterna kalibracija senzora .
4.2.2 Sistem upravljanja	Nepostojanje definisane Politike kvaliteta i Poslovnika o kvalitetu laboratorije.	Izrada dokumentovanog sistema upravljanja kvalitetom koji integriše tehničke i upravljačke procese.
4.2.6 Odgovornost menadžmenta	Nedefinisane uloge; preklapanje dužnosti tehničkog i upravljačkog sektora.	Imenovanje menadžera kvaliteta sa jasnim ovlašćenjima za nadzor nad eksperimentalnim radom.

Uspostavljanje jasnih uloga i odgovornosti unutar laboratorijskog menadžmenta (ISO 17025**,** klauzula 4.2.6), kako predlažu Cebekhulu i Mugova [15], predstavlja mikronivo institucionalne efikasnosti koji direktno korelira sa varijablom GEF (Government Effectiveness) u našem matematičkom modelu: bez precizno uređenog unutrašnjeg sistema upravljanja kvalitetom, čak i najpovoljnije eksterne investicije gube na svojoj efektivnosti usled nepouzdanosti mernih podataka.

STANDARDIZACIJA I KVALITET

Savremeni metodološki pristupi u evaluaciji energetskih projekata, poput onih koje primenjuje Mirova [8], insistiraju na posmatranju čitavog životnog ciklusa, od ekstrakcije sirovina do faze kraja životnog veka. U kontekstu tranzicije na degradiranim rudarskim površinama, inženjerski eksperiment se više ne može fokusirati isključivo na trenutnu efikasnost FNE panela. Neophodno je uvesti koncept sistemske ekološke restauracije, koji predstavlja pomak sa čisto inženjerske sanacije ka holističkom pristupu koji minimizuje rezidualne ESG rizike i osigurava dugoročnu stabilnost ekosistema [16]. Uvođenje održivosti kao vodećeg principa energetskog razvoja zahteva da se sektor energetike, koji zbog oslanjanja na neobnovljive izvore predstavlja realnu pretnju stabilnosti privrednih tokova, u što većoj meri oslanja na obnovljive izvore energije (OIE). Korišćenje energije sunčevog zračenja smatra se jednim od najefikasnijih puteva jer se njime značajno ne remeti prirodna ravnoteža toka materije i energije [17]. Međutim, tehnička realizacija ovog potencijala direktno zavisi od primene rigoroznih standarda koji garantuju kvalitet, trajnost i bezbednost opreme. Kako dalje navode Vukićević i saradnici [17], standardizacija u oblasti sunčeve energije na prostorima Zapadnog Balkana obuhvata ključne aspekte koji su direktno primenjivi na optimizaciju energetskih sistema na degradiranim površinama, oslanjajući se na harmonizovane međunarodne norme:

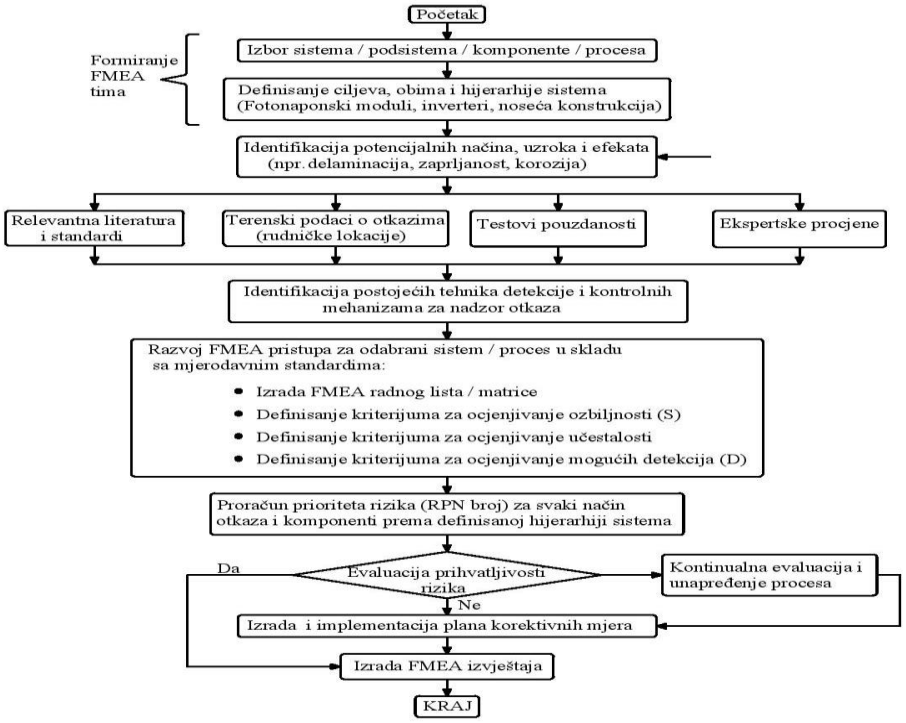
- Terminologija**:** Primena unificiranih tehničkih izraza i definicija prema standardu EN ISO 9488 predstavlja nulti korak u inženjerskom eksperimentu. Bez precizno definisanih pojmova, koji su kroz nacionalne institute (poput BAS, SRPS ili MEST) integrisani u lokalno zakonodavstvo, nemoguće je uspostaviti jedinstven okvir za razumevanje merne nesigurnosti i interpretaciju rezultata dobijenih sa različitih lokacija u regionu.
- Karakteristike prijemnika: Standardi serije ISO 22975 i EN 12975-1 definišu stroge opšte zahteve za trajnost, pouzdanost i mehaničku čvrstoću komponenti. Ovi parametri su kritični pri projektovanju fotonaponskih sistema koji se izlažu specifičnim, često agresivnim uslovima eksploatacije na post-rudarskim površinama, gde su faktori poput vetra, vibracija i hemijskog sastava tla izraženiji nego na standardnim lokacijama.
- Metode ispitivanja: Standardi poput EN ISO 9806 i EN 12977 propisuju rigorozne protokole za validaciju zahteva fabrički proizvedenih sistema.

U kontekstu istraživanja degradiranih površina na prostoru BiH i Srbije, ovi standardi čine osnovu za sistematsko otklanjanje nekonformnosti koje su

tipične za post-rudarske pejzaže u regionu. Ukoliko oprema za upravljanje i senzori ne ispunjavaju stroge zahteve za preciznost i trajnost (prema EN 12977-5), rezultati inženjerskog eksperimenta gube na validnosti, bez obzira na geografsku lokaciju.

Analiza rizika i bezbednosni aspekti standardizacije fotonaponskih sistema

Uspostavljanje standardizovanih procedura (poput onih koje pominje IRENA [7]), ključno je za rešavanje specifičnih rizika na rudničkim lokacijama, kao što su požari na instalacijama ili geotehnička nestabilnost. Sa stanovišta zaštite životne sredine, standardizacija obezbeđuje prevenciju akcidenata koji bi mogli kontaminirati tlo, kroz strogo definisane drenažne sisteme koji sprečavaju da voda korišćena za eventualno gašenje požara na fotonaponskim modulima ispere štetne materije u dublje, rekultivisane slojeve zemljišta. Za sistematsko upravljanje tehničkim i ekološkim rizicima na degradiranim lokacijama, neophodno je primeniti strukturiranu metodologiju poput FMEA analize (eng. Failure Mode and Effects Analysis).



Sl. 1. *Metodološki okvir FMEA analize prilagođen fotonaponskim sistemima na rudničkim lokacijama [18]*

Dijagram (slika 1) prikazuje strukturirani proces upravljanja rizikom koji počinje formiranjem ekspertskog tima i identifikacijom specifičnih uzroka otkaza poput delaminacije i zaprljanosti panela prašinom sa rudarskih površina. Ključna tačka procesa je proračun RPN broja (Risk Priority Number) i evaluacija prihvatljivosti rizika, nakon čega se, po potrebi, vrši implementacija korektivnih mera kako bi se osigurala dugoročna stabilnost energetskog postrojenja. Primena ovog modela u inženjerskom eksperimentu omogućava rangiranje rizika putem RPN broja koji se dobija matematičkom evaluacijom tri ključna faktora prema relaciji:

$$RPN = S \times O \times D$$

Definicija parametara i metodologija evaluacije:

- *S* (Severity – Ozbiljnost) - Procena težine posledice otkaza na rad fotonaponskog sistema (skala 1–10),
- *O* (Occurrence – Učestalost) - Verovatnoća pojavljivanja određenog uzroka otkaza tokom životnog veka postrojenja (skala 1–10),
- *D* (Detection – Detekcija) - Mogućnost da se otkaz ili njegov uzrok otkriju pre nego što nastupi zastoj u proizvodnji (skala 1–10).

Poreklo podataka i metodologija proračuna:

Vrednosti parametara *S, O* i *D* definisane su primenom hibridnog modela evaluacije. Ozbiljnost (*S*) i mogućnost detekcije (*D*) procenjene su na osnovu inženjerskih specifikacija opreme i literaturnih preporuka za fotonaponske sisteme u industrijskim uslovima. S druge strane, učestalost (*O*) je direktno korelirana sa eksperimentalnim rezultatima ovog rada, koristeći terenske podatke o dinamici zaprljanosti panela (λ_p) na konkretnoj lokaciji. Ovakav pristup omogućava da se teoretski okviri rizika kalibrišu prema realnim uslovima eksploatacije na degradiranim rudarskim površinama.

Prema istraživanjima Patila i saradnika [18], najkritičniji načini otkaza kod fotonaponskih panela uključuju delaminaciju i zaprljanost (eng. soiling), što je od posebnog značaja za post-rudarske pejzaže Balkana zbog visoke koncentracije prašine. Savremeni pristup nalaže da se analiza ne oslanja isključivo na literaturne podatke koji predstavljaju zastarele tehnologije, već na hibridne setove koji uključuju terenske podatke o otkazima i ekspertske evaluacije.

Geotehnički izazovi i tehnike dekompaktacije

Jedan od najvećih inženjerskih izazova pri prenameni rudnika u solarne parkove jeste sabijanje tla (eng. soil compaction) uzrokovano decenijskom upotrebom teške mehanizacije [19]. Sabijeno tlo ne samo da ugrožava stabilnost temelja za solarne panele, već onemogućava proces prirodne revegetacije. Kao eksperimentalno rešenje uvode se:

- Tehnike ripanja - Mehaničko razbijanje zbijenih slojeva radi poboljšanja drenaže.
- Fitoremedijacija: Primena specifičnih biljnih vrsta koje apsorbuju rezidualne zagađivače iz zemljišta dok istovremeno stabilizuju podlogu ispod fotonaponskih konstrukcija.

Cirkularni model: Re-mining i ekonomska održivost

Proces napuštanja proizvodnje energije iz uglja pretvara rudnike u tzv. zarobljenu imovinu. Međutim, primena modela re-mining-a omogućava da ovi lokaliteti ponovo postanu produktivni. Dwiharto i saradnici [16] ističu da se rudarski otpad, poput kvarcnog peska (silica), može rafinisati u visokokvalitetne sirovine za proizvodnju solarnih panela i baterija. Tabela 2. prikazuje sinergiju između tehničkih zahvata i ekoloških benefita prema novom modelu:

Tabela 2. *Inovativne strategije upravljanja post-rudarskim prostorom [16]*

Inženjerska strategija	Opis procesa	Doprinos energetskoj tranziciji
Silica Re-mining	Prerada silicijum-dioksida iz jalovine.	Proizvodnja komponenti za FNE i baterijske sisteme.
Sistemska restauracija	Manipulacija biofizičkim faktorima zemljišta.	Stvaranje samoodrživih ekosistema (High Positive Impact).
LCA Evaluacija	Analiza otiska od ekstrakcije do reciklaže.	Minimizacija ESG rizika i „end-of-life“ otpada.
Land Reshaping	Tehnička stabilizacija odlagališta.	Sigurna integracija „Utility Scale“ solarnih parkova.
Valorizacija silikata	Korišćenje kvarcnog peska (materijala sloja) za CFBC.	Smanjenje troškova nabavke sirovina i valorizacija rudarskog otpada u energetski resurs.

Koncept re-mining-a i rafinacije silikata, koje je naveo Dwiharto sa saradnicima [16], nalazi svoju direktnu primenu u tehnološkom procesu TE Stanari. Obzirom na to da TE Stanari koristi savremeni CFBC, za njegov rad je neophodan materijal sloja koji se primarno sastoji od kvarcnog peska visoke čistoće.

U kontekstu inženjerskog eksperimenta, ovo otvara dvostruku mogućnost za optimizaciju:

1. Sinergija resursa: Kvarcni pesak ekstrahovan re-mining-om sa rudarskih odlagališta Stanara može se istovremeno koristiti kao materijal sloja za potrebe TE, ali i kao rafinisana sirovina za lokalnu proizvodnju ili reparaciju komponenti solarnih panela.
2. Smanjenje ekološkog otiska: Ovakav integrisani pristup omogućava da se nusproizvodi jedne tehnologije (rudarstvo/TE) direktno transformišu

u ulazne parametre za drugu (zelena energija/FNE), čime se dramatično smanjuje količina otpada i troškovi transporta sirovina.

Ovaj pristup direktno podržava preporuke Svetske banke [20] o neophodnosti sveobuhvatnih planova remedijacije. Umesto da rudnik ostane ekološki teret, on kroz inženjerski eksperiment postaje baza za novu industrijsku granu – preradu mineralnog otpada za potrebe globalne zelene politike.

EVALUACIJA EKOLOŠKIH, DRUŠTVENIH I UPRAVLJAČKIH ASPEKATA (ESG)

Evaluacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama zasniva se na integraciji tehničkih, ekoloških i upravljačkih faktora, pri čemu se naglasak stavlja na merljivost i primenjivost rezultata u realnim uslovima.

Tehnička infrastruktura i merni sistemi

Za potrebe inženjerskog eksperimenta i monitoringa sistema primenjuju se savremeni merni sistemi zasnovani na DAQ platformama za prikupljanje podataka u realnom vremenu, dok se termovizijska ispitivanja stanja fotonaponskih modula vrše upotrebom bespilotnih letelica. Za procenu energetskog prinosa i optimizaciju sistema koriste se standardni softverski alati (PVSyst, MATLAB, SPSS, Minitab), čime se obezbeđuje pouzdana analiza performansi i verifikacija modela.

Tehnologije za obezbeđivanje fleksibilnosti mreže u post-ugljovnom periodu

Integracija fotonaponskih sistema u elektroenergetsku mrežu zahteva obezbeđivanje fleksibilnosti zbog varijabilnosti sunčevog zračenja. U tom kontekstu, sistemi za skladištenje energije (BESS) omogućavaju balansiranje proizvodnje i potrošnje i rad sistema u optimalnim režimima [21]. Poseban značaj imaju vanadijumske redox-flow baterije (VRFB), koje omogućavaju nezavisno dimenzionisanje snage i kapaciteta skladištenja. Elektrohemijski proces punjenja i pražnjenja opisan je reakcijama:

- Reakcija na anodi:

$$V^{2+} \underset{Punjenje}{\overset{Pražnjenje}{\rightleftarrows}} V^{3+} + e^{-}$$

- Reakcija na katodi:

$$V^{5+} + e^{-} \underset{Punjenje}{\overset{Pražnjenje}{\rightleftarrows}} V^{4+}$$

Napon otvorenog kola iznosi približno E_{ocv} = 1.2 V. Prednost ove

tehnologije ogleda se u mogućnosti dugotrajnog skladištenja energije, što je posebno pogodno za primenu na degradiranim rudarskim lokacijama. Efikasnost sistema zavisi od upravljačkih algoritama, koji omogućavaju pouzdanu procenu stanja napunjenosti i operativnu stabilnost sistema.

Ekološka obnova i sekvestracija ugljenika

Ekološka rekultivacija degradiranih površina doprinosi povećanju neto primarne produktivnosti (NPP) i sekvestraciji ugljenika [22]. Efikasnost korišćenja svetlosti (ε), kao ključni parametar ovog procesa, modeluje se relacijom:

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon 1}(x,t)\cdot T_{\varepsilon 2}(x,t)\cdot W_{\varepsilon}(x,t)\cdot \varepsilon_{max}$$

Definicija parametara:

- $\varepsilon(x,t)$ - Stvarna efikasnost korišćenja svetlosti na lokaciji x u vremenu t,
- ε_{max} - Maksimalna teoretska efikasnost iskorišćenja svetlosti u idealnim uslovima (obično se uzima vrednost iz literature, npr. 0,389gC/MJ),
- $T_{\varepsilon 1}(x,t)$ i $T_{\varepsilon 2}(x,t)$ - Temperaturni stresni koeficijenti koji modeluju ograničenja rasta usled ekstremno niskih ili visokih temperatura,
- $W_{\varepsilon}(x,t)$- Koeficijent vodnog stresa koji reflektuje uticaj vlažnosti vazduha i dostupnosti vode na fotosintezu.

U ovom radu, parametar ε_{max} je preuzet kao referentna vrednost iz relevantne literature za tip vegetacije predviđen projektom rekultivacije (npr. trava ili mešovita šuma). Koeficijenti $T_{\varepsilon 1,}$ $T_{\varepsilon 2}$ i W_{ε} izračunavaju se na bazi meteoroloških podataka (temperatura vazduha i vlažnost) prikupljenih tokom inženjerskog eksperimenta na lokaciji rudnika. Ovakva metodologija omogućava da se teoretski potencijal sekvestracije ugljenika kalibriše prema realnim mikroklimatskim uslovima degradirane rudarske površine. U kontekstu ovog rada, ovakav pristup osigurava da kombinacija solarne energije i biološke obnove maksimizuje ekološki potencijal zemljišta pod različitim klimatskim uslovima.

DISKUSIJA REZULTATA OPTIMIZACIONOG MODELA

Simulacioni rezultati primenjenog optimizacionog modela ukazuju na to da tehnički parametri sistema, posebno gubici usled zaprljanosti panela (λp) i merna nesigurnost (u), imaju direktan i kvantifikovan uticaj na ukupnu proizvodnju električne energije (ES). Smanjenje ovih parametara kroz adekvatno održavanje i unapređenje mernih procedura predstavlja ključni uslov za pove-ćanje energetske efikasnosti sistema na degradiranim rudarskim površinama. Analiza

pokazuje da, iako brownfield lokacije zahtevaju veća početna ulaganja u odnosu na greenfield projekte, prvenstveno zbog složenosti pripreme terena i geotehničkih ograničenja, njihova optimizacija kroz definisani model omogućava efikasnije korišćenje raspoložive površine (S) i postojećih infrastrukturnih resursa. U tom kontekstu, institucionalni faktori, predstavljeni kroz parametar efikasnosti regulatornog okvira (GEF), imaju značajnu ulogu u smanjenju investicionog rizika i omogućavanju realizacije projekata. U skladu sa postavljenim modelom, može se zaključiti da optimizacija energetske tranzicije na degradiranim rudarskim površinama nije isključivo tehnički problem, već rezultat međudelovanja tehničkih parametara sistema i eksternih ograničenja definisanih lokacijskim i regulatornim uslovima.

U ovom delu, rezultati optimizacije se analiziraju kroz prizmu projektovanih scenarija zasnovanih na inženjerskom eksperimentu. S obzirom na to da su parametri dobijeni u kontrolisanim uslovima, Tabela 3 prikazuje očekivana poboljšanja pod pretpostavkom pune implementacije Standardnih operativnih procedura (SOP) i meriteljskih protokola.

Tabela 3. *Projektovane performanse sistema u optimalnom scenariju (pod pretpostavkama SOP-a)*

Parametar optimizacije	Simbol	Inicijalno stanje	Nakon optimizacije	Poboljšanje (%)
Merna nesigurnost (Tip A)	u	8,2%	1,4%	**+ 82,9%**
Gubici usled zaprljanosti	λ_p	12,5%	4,2%	**+ 66,4%**
Godišnja proizvodnja	E_S	18,42 GWh	20,15 GWh*	**+ 9,39%**
Faktor rizika (RPN)	*RPN*	144	48	**- 66,6%**

Interpretacija rezultata i povezivanje funkcija cilja

Vrednosti prikazane u Tabeli 3 predstavljaju simulacione/projektovane rezultate dobijene primenom definisanog optimizacionog modela i pretpostavljenih uslova pune implementacije SOP procedura i ISO/IEC 17025 zahteva. Diskusija rezultata ukazuje na to da se tehnička funkcija cilja (E_S) mora posmatrati kao ulazni podatak za regresioni model (*REC*). Povezanost ove dve funkcije u procesu optimizacije nije direktna u smislu zamene kapaciteta (npr. TE sa FNE), već metodološka. Inženjerska optimizacija merne nesigurnosti (u) direktno hrani regresioni model kvalitetnijim podacima. U tom smislu, procene koeficijenta α_1 i α_4 u modelu *REC* postaju statistički stabilnije jer se smanjuje slučajna greška (ε). To znači da, pod pretpostavkom definisanom u SOP-u, stroga kontrola meriteljstva prema ISO 17025 standardu pretvara brownfield lo-

* Vrednost dobijena simulacijom modela pod pretpostavkom eliminacije sistematskih meriteljskih grešaka.

kaciju iz nepouzdanog energetskog resursa u predvidljiv element energetskog miksa. Iako fotonaponski sistemi na degradiranim površinama objektivno ne mogu u potpunosti kompenzovati snagu baznih postrojenja (poput TE snage 300 MW), njihova optimizacija kroz ovaj model doprinosi energetskoj diversifikaciji (EDF faktor) i smanjenju ESG rizika, što je ključni zahtev moderne energetske tranzicije.

ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja potvrđuju da se energetska tranzicija na degradiranim rudarskim površinama ne može posmatrati izolovano, već kao složen inženjerski problem čija uspešnost zavisi od integracije dve funkcije cilja. Prva funkcija, tehničko-meriteljska (E_S), kroz inženjerski eksperiment i strogu primenu standarda ISO/IEC 17025, osigurava predvidljivost proizvodnje energije. Kvantifikacijom uticaja zaprljanosti (λ_p) i redukcijom merne nesigurnosti (u), degradirane površine prestaju biti rizične lokacije i postaju tehnički pouzdani energetski sistemi. Projekcije modela ukazuju na mogućnost povećanja efikasnosti proizvodnje za 9,39% uz značajno smanjenje faktora rizika (*RPN*). Druga funkcija, regresiono-ekonomska (*REC*), koristi optimizovane podatke iz prve funkcije kako bi kvantifikovala nivo energetske tranzicije. Povezanost ove dve funkcije u procesu optimizacije je hijerarhijska: tehnička preciznost na terenu (prva funkcija) direktno smanjuje slučajnu grešku (ε) u regresionom modelu (druga funkcija). Time se dokazuje da sinergija meriteljske sledivosti i institucionalne podrške (*GEF*) čini brownfield investicije (*BFI*) ekonomski superiornijim u odnosu na greenfield projekte.

Uvođenje standardizovanih SOP-ova i naprednih tehnologija skladištenja (VRFB) postavlja merljivu osnovu za stabilnost elektroenergetskog sistema u post-ugljovnom periodu. Iako fotonaponski sistemi na specifičnim lokacijama poput rudnika Stanari predstavljaju samo deo energetskog miksa, primenjeni metodološki okvir ukazuje da energetska tranzicija oštećenih zemljišta, uz adekvatnu optimizaciju, može predstavljati efikasan put ka dekarbonizaciji i ispunjenju ESG ciljeva.

LITERATURA

[1] ICMA (2025). Solar@Scale: Siting Solar on Brownfields and Underutilized Lands. Webinar Proceedings, International City/County Management Association, March 19, 2025, 9-10

[2] Yahya, F., & Rafiq, M., (2019). Brownfield, greenfield, and renewable energy consumption: Moderating role of effective governance. SAGE, Energy & Environment, 30(5), 1-19

[3] Borojević, S., (1978). Metodologija eksperimentalnog naučnog rada, drugo izdanje, Radnički Univerzitet Radivoj Ćirpanov, Novi Sad, 68-70

[4] Rushing, H., Karl, A., & Wisnowski, J. (2013). Design and analysis of experiments by Douglas Montgomery: A supplement for using JMP, Cary, NC: SAS Institute Inc. 1-5

[5] Song, J., Choi, Y., Yoon, S., (2015). Analysis of photovoltaic potential at abandoned mine promotion districts in Korea, Geosystem Engineering, Vol. 18, No.3, Pukyong National University, 168-172

[6] Đekić, S., Kovačević A., Brajović, D., Osmokrović, P., (2016). Merenje dielektričnih osobina: statistička organizacija i izražavanje merne nesigurnosti, monografija, Zavod za fiziku, tehničkih fakulteta, Univerziteta Bograd, 249-250

[7] IRENA, International Renewable Energy Agency, (2013). International Standardisation in the Field of Renewable Energy, Innovation and Technology Centre, Bonn. 35-36

[8] Mirova, (2024). Energy Transition Infrastructure, Impact Report 2024, Mirova Research Center, NATIXIS Investment Managers, Cs St Paul de Tartas, 20-23

[9] Princic, K., (2025). Harnessing the Sun to Empower Communities Repurposing Landfills and Brownfields for Solar Development, CEP Renewables, Chagrin Falls, 18-25

[10] Saleh, H. M., Hassan, A. I., (2024). The challenges of sustainable energy transition: A focus on renewable energy, Review Article, Applied Chemical Engineering (2024) Volume 7 Issue 2, Radioisotope Department, Nuclear Research Center, Cairo, 1-24

[11] Sakellariou, N. & Mulvaney, D., (2013). Engineers and the Renewable Energy Transition: Challenges and Opportunities, Journal Of Professional Issues In Engineering Education & Practice © ASCE / January 2013, University Of California, LIB., 12-18

[12] Fotis, G., Maris, T. I., Mladenov, V., (2025). Risks, Obstacles and Challenges of the Electrical Energy Transition in Europe: Greece as a Case Study, Sustainability 2025, 17, 5325., MDPI, Basel, 1-3

[13] Akaev, A. A. & Davydova, O. I., (2021). Mathematical Description of Energy Transition Scenarios Based on the Latest Technologies and Trends, Energies 2021, 14, 8360, MDPI, Basel, 9-12

[14] Akaev, A. A. & Davydova, O. I., (2021). A Mathematical Description of Selected Energy Transition Scenarios in the 21st Century, Intended to Realize the Main Goals of the Paris Climate Agreement, Energies 2021, 14, 2558, MDPI, Basel, 3-13

[15] Cebekhulu, B. M. B. & Mugova, C., (2017). Quality Control in a University Laboratory: Evaluating the Gap between ISO/IEC-17025 Requirements and the Thin Section Laboratory's Processes, Proceedings of the 2017 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) Bristol, UK, July 24-25, 2017, 614-625

[16] Dwiharto, A., Djumarno, D., Riyanto, S., & Permana, D., (2025). Sustainable Post-mining Management is a Practical Solution in Ecology Restoration and Green Energy Innovation, The Mercu Buana Ecobiz Energy International Conference: Sustainability and ESG Reporting in the Energy Sector, Faculty of Economic and Business Management, Universitas Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, 103-112

[17] Vukićević, A., Topalović, I., Petković, M., Mirković Đorđević, M., (2018). Standardizacija u oblasti obnovljivih izvora energije, 31. Međunarodni kongres o procesnoj industriji – Procesing 18, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 83-93.

[18] Patil, R. B., Khalkar, A., Al-Dahidi, S., Pimpalkar, R. S., Bhandari, S., Pecht, M., (2024). Reliability and Risk Assessment of Solar Photovoltaic Panels Using a Failure Mode and Effects Analysis Approach: A Case Study. Sustainability 2024, 16, 4183, MDPI, Basel, 7-14

[19] Saputra, R., Hanum, W. N., & Gunawan, V. A., (2025). Post-Mining Land Use Regulations and Practices in the United States of America: Lesson for Indonesia. Journal of Law, Environmental and Justice, 3(1), 104-133.

[20] The World Bank, (2023). Scaling Up to Phase Down: Financing Energy Transitions in the Power Sector, International Bank for Reconstruction and Development, Washington 27-31

[21] Lawder, M. T., Suthar, B., Northrop, P. W. C., De, S., Hoff, C.M., Leitermann O., (2014). Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, BESS and BMS for Grid-Scale Applications, 0018-9219 2014, IEEE, 8-9

[22] Liao, Q., Liu, X., Xiao, M., (2022). Ecological Restoration and Carbon Sequestration Regulation of Mining Areas—A Case Study of Huangshi City, Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 4175, MDPI, Basel, 3-6